中国生态农业学报 2017 年 8 月 第 25 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2017, 25(8): 1173−1180



DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170029

伍朝荣, 黄飞, 高阳, 毛一航, 蔡昆争. 土壤生物消毒对土壤改良、青枯菌抑菌及番茄生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1173−1180
Wu C R, Huang F, Gao Y, Mao Y H, Cai K Z. Effect of biological disinfestation on soil improvement, *Ralstonia solanacearum* suppression and tomato growth[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8): 1173−1180

# 土壤生物消毒对土壤改良、青枯菌抑菌及番茄生长的影响*

伍朝荣, 黄 飞, 高 阳, 毛一航, 蔡昆争**

(华南农业大学/农业部华南热带农业环境重点实验室/华南农业大学资源环境学院 广州 510642)



**摘 要:** 针对目前作物集约化和单一化种植所造成的土壤连作障碍以及退化问题, 通过土壤培养试验和田间试验研究了土壤生物消毒(土壤中添加 2%的米糠、麦麸、茶籽麸后覆盖塑料薄膜, 以不添加物料不覆盖为对照)对土壤特性、防控青枯病、番茄生长及产量和品质的影响, 以期为土壤生物消毒法的理论研究和实践应用提供参考。结果表明, 与对照相比, 不同土壤生物消毒处理均能显著提高土壤温度、pH 和电导率, 降低土壤 Eh, 显著减少土壤中 97.27%~99.14%青枯菌数量; 同时显著增加土壤有机质、全氮、碱解氮和速效钾含量, 而对全磷和全钾影响不显著。不同土壤生物消毒处理能显著降低青枯病发病率 29.41%~42.65%。此外, 土壤生物消毒显著提高番茄叶片 $F_v/F_m$, 对光合参数净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 $CO_2$ 浓度影响不显著; 显著增加番茄株高(16.90%~29.15%)和产量(41.41%~56.25%); 果实糖酸比、可溶性糖含量也有所增加。以添加麦麸的生物消毒在提高 pH、防控青枯病及提高产量的效果最佳。综合来看, 作为一种非化学土壤消毒方法, 土壤生物消毒在改良土壤、防控土传病害青枯病和促进番茄生长方面表现出较好的优势, 值得推广应用。

**关键词:** 土壤生物消毒; 青枯病; 土壤养分; 光合特性; 番茄生长; 番茄产量
**中图分类号:** S472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)08-1173-08

# Effect of biological disinfestation on soil improvement, *Ralstonia solanacearum* suppression and tomato growth*

WU Chaorong, HUANG Fei, GAO Yang, MAO Yihang, CAI Kunzheng**

(Key Laboratory of South China Agro-environment in Tropic, Ministry of Agriculture / College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Soil-borne diseases and soil degradation caused by continuous cropping or monoculture restrain the sustainable development of agriculture. Chemical soil fumigation is the most popular method used to control soil-borne diseases in terms of cost and efficacy, but its negative impact on the environment raises a significant concern. Biological soil disinfestation (adding organic materials in soil and mulching for certain time, BSD) is widely used as alternative improvement of degraded soils and in preventing the occurrence of soil-borne diseases. To solve the problems associated with continuous cropping and the soil degradation caused by the intensification of monoculture, the effects of BSD on soil properties, bacterial wilt control and tomato growth were determined in soil

* 广东省科技计划项目(2015A050502043)和国家自然科学基金项目(31370456)资助
** 通讯作者: 蔡昆争, 主要研究方向为生态学。E-mail: kzcai@scau.edu.cn
伍朝荣, 主要研究方向为农业生态。E-mail: 1067490710@qq.com
收稿日期: 2017-01-09 接受日期: 2017-03-30
* This study was founded by Guangdong Science and Technology Plan Project (2015A050502043) and the National Natural Science Foundation of China (31370456).
** Corresponding author, E-mail: kzcai@scau.edu.cn
Received Jan. 9, 2017; accepted Mar. 30, 2017

incubation and field experiments. There were four treatments in the experiment — the control (CK), BSD with 2% rice bran, wheat bran and tea seed bran. The results showed that different BSD treatments had no significant effect on soil total P and K content, but significantly increased soil temperature, pH, electric conductivity and contents of organic matter, total N, available N and available K. Contrarily BSD treatments significantly reduced soil Eh and the amount of *Ralstonia solanacearum* in the soil by 97.27%–99.14%. BSD treatments reduced the incidence of bacterial wilt by 29.41%–42.65%, which in turn enhanced tomato plant resistance against the disease. In addition, BSD significantly increased chlorophyll fluorescence parameter $F_v/F_m$ of tomato leaves, but it had no significant effect on net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular $CO_2$ concentration. BSD treatments increased tomato yield by 41.41%–56.25%, and the ratio of sugar to acid and soluble sugar content of tomato fruits. Among different organic materials, BSD with wheat bran had the best effect in terms of soil improvement, yield increase and bacterial wilt suppression. In summary, the potential of BSD was promising for the improvement of soil, prevention and control of soil-borne bacterial wilt disease and promotion of tomato growth. Thus BSD was critical for a non-chemical disinfection of cultivated soils.
**Keywords:** Biological disinfection of soil; Bacterial wilt; Soil nutrient; Photosynthetic characteristics; Tomato growth; Tomato yield



番茄(*Solanum lycopersicum*)作为世界蔬菜产量最高的种类之一，果实营养丰富，有着菜中之果的美誉，也是我国农业生产中主要栽培蔬菜种类之一。自 1978 年以来，我国番茄的种植面积不断扩大，总产量随之迅速增长。2011 年中国的番茄种植面积为 98 万 hm$^2$，产量为 4 800 万 t，居世界第一位[1]。但种植的集约化、规模化、单一化所造成的土壤退化和连作障碍等问题严重制约了番茄生产。特别是由连作障碍所引起的土传病害青枯病尤为严重，难于防治，被称为"植物癌症"。该病害主要发生在我国长江以南尤其是华南地区，已经给农业生产造成了巨大的经济损失[2]。

近年来，土壤生物消毒(biological soil disinfestation, BSD)作为一种防控土传病害和改良土壤的方法，在国外已得到广泛应用。该方法不仅能有效控制土传病害和杂草，还能充分利用农业废弃物(作物秸秆和动物粪便等)来改善土壤质量[3]。国内外学者在土壤生物消毒处理防控土传病害及改良土壤等方面开展了一系列工作[3-5]。研究表明，BSD 能有效降低连作障碍土壤积累的 $NO_3^-$和 $SO_4^{2-}$含量，有效提高土壤 pH 和增加部分土壤养分，并能有效防控部分杂草、土壤害虫、土传真菌或细菌性病原菌。因此，BSD 在改善土壤盐渍化、土壤酸化、防控土传病虫害、提高土壤肥力等方面均优于其他消毒方法，从而确保农作物稳产增产[6-7]。目前，土壤生物消毒作为一种高效、广谱性和环境友好型的土壤熏蒸方法，逐步在国内外推广应用。但是，目前的研究主要局限于少数几种土传病害的抗性研究，而对土壤养分、作物生长、产量及农产品品质的影响方面报道较少。针对蔬菜作物长期连作导致土壤理化性状恶化，土传青枯病高发，作物产量及品质降低等诸多问题，本研究以培养试验和田间试验相结合，研究土壤生物消毒对青枯菌的抑菌效果、土壤特性及番茄生长及品质的影响，以期为土壤生物消毒法的理论研究和实践应用提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤及材料

田间试验和培养试验供试土壤均来自广东省广州市增城区朱村镇同一地块(113.70°E, 23.28°N)。土壤偏酸性和黏性，土壤理化性状为：有机质含量 16.4 g·kg$^{-1}$，全氮 0.81 g·kg$^{-1}$，全磷 1.12 g·kg$^{-1}$，全钾 27.9 g·kg$^{-1}$，碱解氮 82.65 mg·kg$^{-1}$，有效磷 72.80 mg·kg$^{-1}$，速效钾 120.28 mg·kg$^{-1}$，pH 4.55，含水量 15.78%，电导率(EC)0.062 mS·cm$^{-1}$。供试验田块历年进行水稻(*Oryza sativa*)(上半年)与番茄(下半年)轮作，轮作年限超过 5 年，番茄青枯病历年发生，受各种因素影响发病程度不一，但总体呈逐年增加，最近一次青枯病发病率超过 45.0%。

田间和培养试验土壤生物消毒用的 3 种有机物料分别为米糠、麦麸和茶籽麸，粗粉状态，购买于广州市增城区朱村镇，有机物料碳、氮含量及碳氮比见表 1。田间试验供试番茄品种为'佳农 T018'，西安宏丰种业有限公司生产。青枯菌(*Ralstonia solanacearum*)菌种选用生理小种Ⅰ生化型Ⅲ，由华南农业大学园艺学院提供。

表 1 土壤生物消毒所用有机物料碳、氮含量
Table 1 Contents of carbon and nitrogen of organic materials used for biological soil disinfestation

| 样品 Sample | 全碳 Total carbon (%) | 全氮 Total nitrogen (%) | 碳氮比 C/N ratio |
|---|---|---|---|
| 米糠 Rice bran | 40.13 | 0.490 | 81.89 |
| 麦麸 Wheat bran | 34.53 | 0.790 | 43.71 |
| 茶籽麸 Tea seed bran | 37.89 | 0.764 | 49.59 |

### 1.2　试验设计

#### 1.2.1　田间试验

于 2015 年 9 月 25 日至 2016 年 4 月 8 日进行田间试验。田间试验设对照(CK)和分别添加米糠(ADR)、麦麸(ADW)、茶籽麸(ADT)的生物消毒处理, 共 4 个处理, 每个处理 4 次重复。田间采用随机区组设计, 小区面积为 12.0 m×1.0 m=12.0 $m^2$。3 种有机物料按每平米 1.0 kg 添加。具体操作: (1)处理组分别添加米糠、麦麸和茶籽麸 3 种有机物料, 对照不添加任何物料; (2)机械充分混匀, 灌水至完全湿透; (3)覆盖塑料薄膜处理, 使其达到厌氧、保湿及防治杂草效果, 生物消毒 3 周。(4)处理结束, 去薄膜, 放置 2 周。采用双行种植, 株距 24.0 cm, 行距 30.0 cm, 每小区定植 3~4 片真叶的番茄幼苗 100 株。番茄定植后, 按常规进行田间统一管理。

试验处理期间, 每 5 d 测定一次土壤上层 20.0 cm 深处土温, 于当日 13:00(一天内土温最高值)进行。处理 3 周结束, 立即取鲜土样测定氧化还原电位(Eh); 另取一份土样自然风干, 过筛, 用于测 pH、电导率(EC)。定植番茄后, 于开花坐果期, 选取番茄上、中、下处叶片测定叶绿素含量; 选取距离顶端第 3 张叶片测定 $F_v/F_m$(PS II 光化学效率)和光合作用参数。番茄生长期间记录青枯病发病率和产量, 果实成熟期, 分别选取第 2、3 穗果实测定品质。

#### 1.2.2　土壤培养试验

土壤培养试验设 4 个处理, 对照(CK)和添加米糠(ADR)、麦麸(ADW)、茶籽麸(ADT)的生物消毒处理, 每个处理 4 次重复。试验取 2.0 kg 供试土壤, 添加 20.0 mL 青枯菌菌悬液, 以上有机物料分别添加 40.0 g(2%)于盆钵中, 充分混匀, 灌水 560.0 mL 至土壤湿润, 转入 20 cm×30 cm 自封袋中密封处理, 其中对照为不添加有机物料、水和不密封处理。所有处理组置于室外露天下 3 周。试验于 2016 年 5 月 11 日至 6 月 2 日进行。

试验处理期间测定土壤温度。处理结束后, 打开自封袋, 立即取鲜土样用于测定土壤 Eh 和土壤青枯菌数量, 另取一份土样自然风干, 过筛, 供土壤 pH、电导率(EC)和养分测定。

### 1.3　取样方法及测定项目

#### 1.3.1　土壤温度、pH、EC 和 Eh

土壤温度测定参照国标(GB7839—87), 采用轻便插入式地温计。将风干土样与 1.0 $mol \cdot L^{-1}$ KCl 溶液以 1∶5 的比例混匀, 震荡 1 h, 静置 1 h 后, 采用雷磁 PHS-3C 型酸度计测定水提溶液的 pH; 将风干土样和去离子水(EC<0.2 $\mu S \cdot cm^{-1}$)以 1∶5 的比例混匀, 搅拌平衡 20 min, 过滤, 用 SIN CT-TDS3031 型电导率笔测定滤液 EC; 土壤 Eh 采用 SX712 型 ORP 计测定(水土比为 5∶1)。

#### 1.3.2　土壤养分及有机物料碳、氮含量

参照文献[8]的方法测定土壤有机质、全氮磷钾、碱解氮、有效磷、速效钾和有机物料全碳、全氮的含量。有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法, 全氮采用开氏-蒸馏滴定法, 全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法, 全钾采用氢氧化钠熔融-火焰原子吸收分光光度法, 碱解氮采用碱解扩散法, 有效磷采用盐酸-氟化铵提取-钼锑抗比色法, 速效钾采用乙酸铵提取-火焰原子吸收分光光度法。

#### 1.3.3　土壤青枯菌含量测定

土壤青枯菌含量测定采用 2,3,5-氯化三苯基四氮唑培养基(TTC 培养基), 按照平板计数法计数。计算公式: 每克干土中的菌数=(每个稀释度的 3 次重复的菌落平均数×稀释倍数)/(土样质量×土壤含水率)。

#### 1.3.4　病情调查

田间试验番茄幼苗定植 2 周后, 每隔 3 d 观察并记录青枯病发病率, 直至番茄整株发病枯死, 整个记录周期为 60 d。

#### 1.3.5　番茄叶绿素含量、叶绿素荧光及光合参数

叶绿素含量采用 SPAD-502-PLUS 型(柯尼卡美能达公司)活体叶绿素仪测定。使用 OS-30P 叶绿素荧光仪(英国 INC 公司)和 Li-6400 型光合仪分别测定了 $F_v/F_m$(PS II 光化学效率)值和光合作用参数, 光合参数包括光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 $CO_2$ 浓度。所有处理组, 每个指标均重复测定 5 株。

#### 1.3.6　番茄产量及品质

按照每个小区所有植株收获量(可供销售的)进行计算, 直至收获完成, 统计产量。可溶性糖含量采用蒽酮比色法[9], 蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 法[9], 硝酸盐含量采用比色法[9], 有机酸含量采用氢氧化钠滴定法[9], 维生素 C 含量采用二甲苯萃取比色法测定[9]。

### 1.4　数据分析

试验数据计算及处理间的差异显著性检验(one-way ANOVA, LSD $P$<0.05)采用 SPSS 18.0 软件, 作图采用 Microsoft Excel 2010。

## 2　结果与分析

### 2.1　土壤生物消毒对土壤温度、pH、EC 和 Eh 的影响

在培养试验(图 1A)和田间试验(图 1B)中, 土壤生物消毒处理较对照均能显著提高土壤温度, 且分别提高 7~8 ℃和 5~6 ℃; 3 种生物消毒处理间差异不显著。

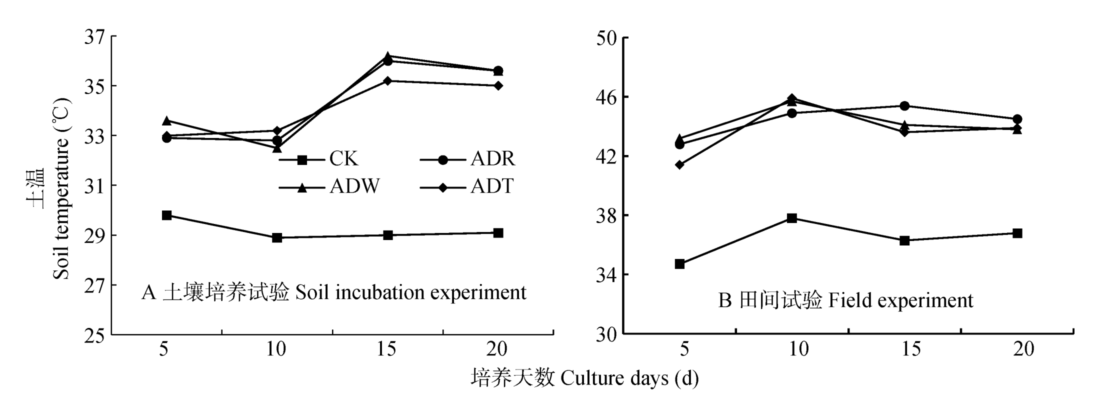



**图 1　土壤生物消毒处理对 20 cm 土壤温度的影响**

Fig. 1　Changes of soil temperature at 20 cm depth under different biological soil disinfestation methods

CK: 对照; ADR: 添加米糠生物消毒; ADW: 添加麦麸生物消毒; ADT: 添加茶籽麸生物消毒。CK: control; ADR: biological soil disinfestation of adding rice bran; ADW: biological soil disinfestation of adding wheat bran; ADT: biological soil disinfestation of adding tea seed bran.

生物消毒对土壤 pH、EC、Eh 的影响见图 2。培养试验和田间试验不同 BSD 处理均能显著提高土壤 pH, 与 CK 相比提高幅度为 14.89%~19.11%(图 2A)。与 CK 相比, 培养试验(图 2B)BSD 处理显著增加土壤 EC, 增幅 4~6 倍; 而田间试验中, 仅 ADW 处理组土壤 EC 值显著高于对照。培养试验中 BSD 处理显著降低土壤 Eh, 且降低至负值; 而田间试验表明, 除 ADR 处理组土壤 Eh 显著低于对照外, 其他处理无显著差异(图 2C)。

### 2.2　土壤生物消毒对土壤养分及青枯菌数量的影响

培养试验处理 3 周后, 土壤养分含量变化如表 2 所示。与对照相比, 不同 BSD 处理能显著改善土壤养分, 其中土壤有机质增加 32.11%~82.95%, 全氮增加 12.08%~59.36%, 速效钾增加 1.28~2.43 倍, 而对全磷、全钾、有效磷含量影响不显著。此外, 各处理土壤青枯菌数量变化见图 3, 与 CK 相比, 各 BSD 处理能显著降低 97.27%~99.14%青枯菌数量。

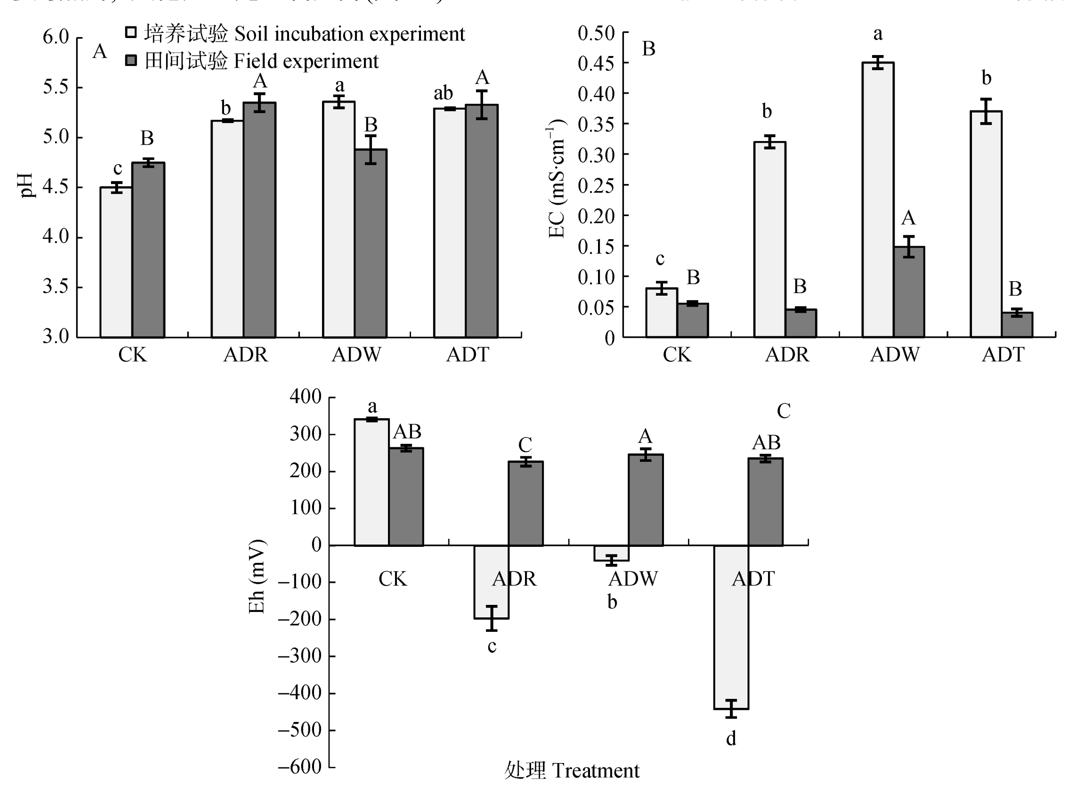



**图 2　土壤生物消毒对土壤 pH、EC 及 Eh 的影响**

Fig. 2　Effect of biological soil disinfestation method on soil pH, EC and Eh

CK: 对照; ADR: 添加米糠生物消毒; ADW: 添加麦麸生物消毒; ADT: 添加茶籽麸生物消毒。不同小写和大写字母分别表示培养试验和田间试验不同处理差异显著($P$<0.05)。CK: control; ADR: biological soil disinfestation of adding rice bran; ADW: biological soil disinfestation of adding wheat bran; ADT: biological soil disinfestation of adding tea seed bran. Different lowercases and capital letters mean significant differences ($P$ < 0.05) among treatments in soil incubation experiment and field experiment, respectively.

表 2　土壤生物消毒对不同土壤养分含量的影响
Table 2　Effect of soil biological disinfection method on soil nutrients

| 处理 Treatment | 有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$) | 全氮 Total nitrogen ($g\cdot kg^{-1}$) | 全磷 Total phosphorus ($g\cdot kg^{-1}$) | 全钾 Total potassium ($g\cdot kg^{-1}$) | 碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen ($mg\cdot kg^{-1}$) | 有效磷 Available phosphorus ($mg\cdot kg^{-1}$) | 速效钾 Available potassium ($mg\cdot kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CK | 16.60±0.37c | 0.753±0.006b | 1.344±0.018a | 29.01±0.42a | 81.20±1.81c | 86.13±4.63a | 78.78±2.33c |
| ADR | 30.37±1.17a | 0.844±0.018b | 1.354±0.032a | 28.36±0.19a | 74.14±5.37c | 68.93±4.76a | 179.69±3.29b |
| ADW | 21.93±1.12b | 1.200±0.026a | 1.467±0.025a | 28.84±0.12a | 199.78±3.34a | 68.00±2.73a | 253.19±1.06a |
| ADT | 28.72±1.09a | 1.062±0.021a | 1.406±0.019a | 28.94±0.16a | 118.16±1.04b | 81.87±4.90a | 270.49±3.07a |

CK: 对照; ADR: 添加米糠生物消毒; ADW: 添加麦麸生物消毒; ADT: 添加茶籽麸生物消毒。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。CK: control; ADR: biological soil disinfestation of adding rice bran; ADW: biological soil disinfestation of adding wheat bran; ADT: biological soil disinfestation of adding tea seed bran. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

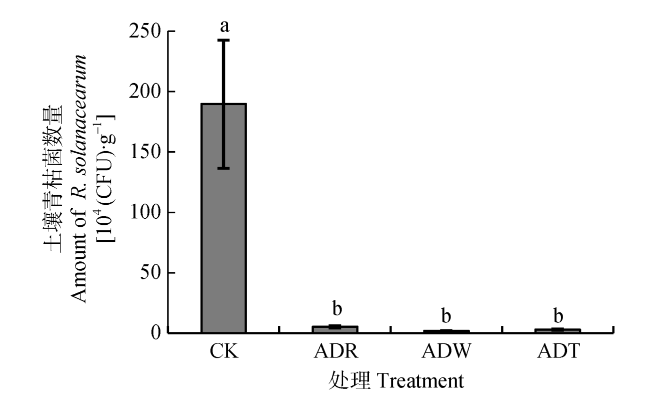



图 3　土壤生物消毒对土壤青枯菌数量的影响
Fig. 3　Effects of biological soil disinfestation methods on the amount of *Ralstonia solanacearum* in soil

CK: 对照; ADR: 添加米糠生物消毒; ADW: 添加麦麸生物消毒; ADT: 添加茶籽麸生物消毒。不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。CK: control; ADR: biological soil disinfestation of adding rice bran; ADW: biological soil disinfestation of adding wheat bran; ADT: biological soil disinfestation of adding tea seed bran. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

### 2.3　土壤生物消毒对叶片光合作用、叶绿素含量及叶绿素荧光参数 $F_v/F_m$ 的影响

与对照相比, BSD 不同处理对番茄叶片净光合速率、气孔导度、胞间 $CO_2$ 浓度、蒸腾速率均无显著影响, 但各 BSD 处理的番茄叶片叶绿素荧光参数 $F_v/F_m$ 值均高于 CK, 其中 ADR 和 ADW 处理达到显著差异(表 3)。此外, ADW 处理还显著增加了番茄叶片的叶绿素含量 SPAD 值, 但 ADR 和 ADT 处理的叶片叶绿素含量则与 CK 处理无显著差异。

### 2.4　土壤生物消毒对番茄生长、青枯病抗性和产量的影响

在番茄生长后期(果实膨大期), 不同 BSD 处理均显著增加植株高度, 其中以 ADW 处理株高增加幅度最大, 较 CK 提高 29.2%, 而对茎粗无显著影响(图 4A, 4B)。番茄青枯病发病统计期间, 不同 BSD 处理均能有效降低发病率, 第 56 d ADR、ADW 和 ADT 处理发病率较 CK 分别降低 42.65%、40.41%和 29.41%(图 4C), 番茄产量则分别提高 45.31%、56.25%和 41.41%, 其中 ADW 处理增加幅度最大(图 4D)。

### 2.5　土壤生物消毒对番茄品质的影响

各处理组番茄品质指标的测定结果见表 4。与 CK 相比, 除了 ADT 处理能显著增加番茄果实可溶性糖、糖酸比外, 其他 BSD 处理对番茄果实的 Vc 和可溶性蛋白含量具有一定提高作用, 但效果不显著, 对有机酸和硝酸盐没有显著影响。

表 3　土壤生物消毒对番茄叶片光合作用、叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响
Table 3　Effect of biological soil disinfection method on leaf photosynthetic parameters of tomato

| 处理 Treatment | 净光合速率 Photosynthetic rate [$\mu mol(CO_2)\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$] | 气孔导度 Stomatal Conductance [$mmol(H_2O)\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$] | 胞间 $CO_2$ 浓度 Cell interval $CO_2$ concentration [$\mu mol(CO_2)\cdot mol^{-1}$] | 蒸腾速率 Transpiration rate ($mmol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$) | SPAD | $F_v/F_m$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CK | 12.14±0.67a | 0.13±0.01a | 216.7±5.6a | 2.43±0.11a | 45.89±0.62b | 0.78±0.01b |
| ADR | 11.53±0.88a | 0.11±0.01a | 198.3±12.6a | 1.65±0.30a | 45.45±0.57b | 0.82±0.01a |
| ADW | 12.13±1.30a | 0.12±0.02a | 210.3±7.8a | 1.84±0.25a | 48.60±0.49a | 0.82±0.02a |
| ADT | 13.30±0.78a | 0.13±0.01a | 206.0±3.5a | 2.07±0.33a | 45.80±0.61b | 0.80±0.01ab |

CK: 对照; ADR: 添加米糠生物消毒; ADW: 添加麦麸生物消毒; ADT: 添加茶籽麸生物消毒。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。CK: control; ADR: biological soil disinfestation of adding rice bran; ADW: biological soil disinfestation of adding wheat bran; ADT: biological soil disinfestation of adding tea seed bran. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

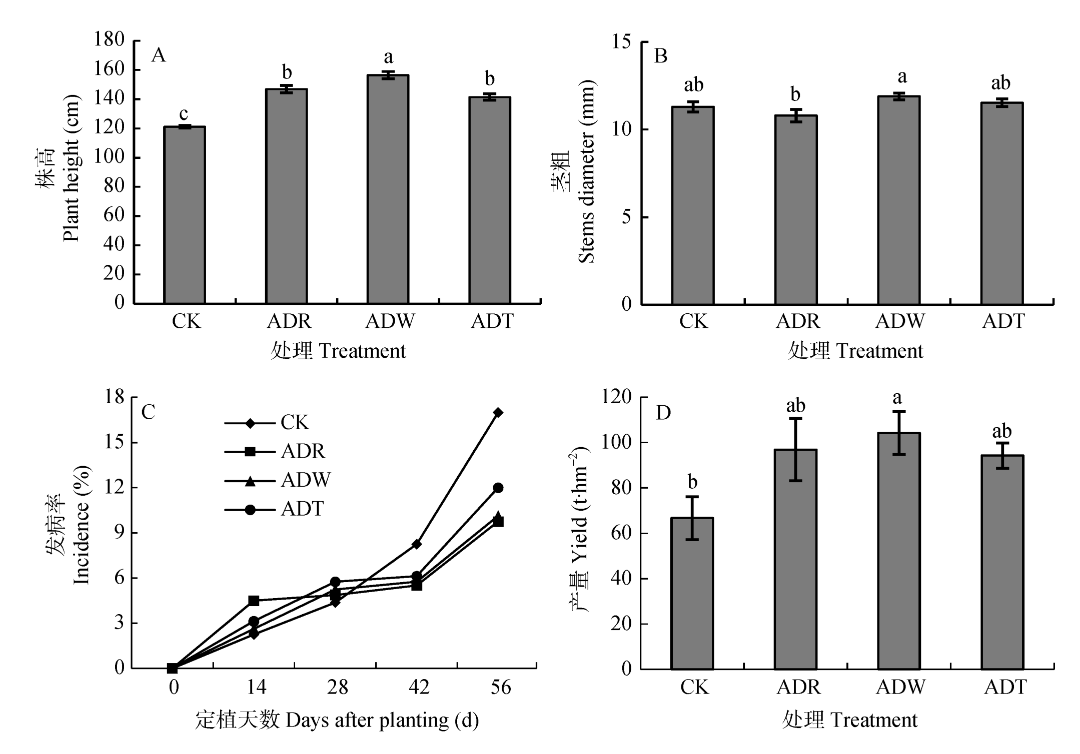



**图 4 土壤生物消毒对番茄生长、防病和产量的影响**

Fig. 4 Effects of biological soil disinfestation methods on growth, disease control and yield of tomato

CK: 对照; ADR: 添加米糠生物消毒; ADW: 添加麦麸生物消毒; ADT: 添加茶籽麸生物消毒。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P$<0.05)。CK: control; ADR: biological soil disinfestation of adding rice bran; ADW: biological soil disinfestation of adding wheat bran; ADT: biological soil disinfestation of adding tea seed bran. Different lowercase letters above bars indicate significant differences among treatments ($P$ < 0.05).

**表 4 土壤生物消毒对番茄品质的影响**

Table 4 Effects of biological soil disinfestation methods on tomato quality

| 处理 Treatment | Vc 含量 Vc content [mg·(100g)$^{-1}$] | 可溶性蛋白 Soluble protein (μg·g$^{-1}$) | 有机酸 Organic acid (%) | 可溶性糖 Soluble sugar (%) | 硝酸盐 Nitrate (μg·g$^{-1}$) | 糖酸比 Sugar/acid |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CK | 60.25±4.60a | 45.49±3.30a | 0.23±0.02a | 1.13±0.13b | 830.9±63.4ab | 5.30b |
| ADR | 61.80±1.40a | 56.01±4.00a | 0.23±0.02a | 1.14±0.18b | 974.1±182.0a | 5.09b |
| ADW | 65.70±1.80a | 55.63±4.50a | 0.21±0.01a | 1.08±0.10b | 467.0±112.3b | 5.35b |
| ADT | 63.00±1.20a | 55.64±4.90a | 0.22±0.01a | 1.87±0.20a | 1 120.0±202.0a | 8.45a |

CK: 对照; ADR: 添加米糠生物消毒; ADW: 添加麦麸生物消毒; ADT: 添加茶籽麸生物消毒。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P$<0.05)。CK: control; ADR: biological soil disinfestation of adding rice bran; ADW: biological soil disinfestation of adding wheat bran; ADT: biological soil disinfestation of adding tea seed bran. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P$ < 0.05).

## 3 讨论

随着设施蔬菜栽培技术的发展和不断完善，番茄栽培由季节性向全年性发展，高密度复种，大量使用化肥农药，田间管理不当，使得连作障碍和土传青枯病发生尤为严重。青枯病病害的发生与土壤中温度、湿度、酸碱度等多种理化因素有关，该病害喜欢高温、高湿、偏酸性的环境，发病温度范围在 10~40 ℃，最适温度为 30~37 ℃。本研究结果显示，BSD 处理均能有效提高土壤温度和 pH，降低 Eh。特别是培养试验中，BSD 处理土壤最高温度接近 45 ℃，Eh 降低到负值，这使得土壤处在一种高温、强还原性或厌氧环境状态，不利于青枯菌的繁殖，从而造成土壤中青枯菌的数量大幅下降和青枯病的发病率显著降低。试验中土壤温度的提高主要是太阳能加热以及有机物的化学分解，而 BSD 处理对土壤酸碱度的影响与添加的有机物料种类密切相关[10]。本研究中，以米糠、麦麸和茶籽麸作为碳源的 BSD 处理，均能提高土壤 pH 14.89%~19.11%；除了与有机物料有关之外，可能还与供试土壤初始 pH 较低有关，这一结果与 Hewavitharana 等[11]研究相似。

培养试验中，BSD 处理能显著降低土壤 Eh，这一变化趋势与部分文献报道一致[12-14]。原因可能是不同 BSD 处理处于密封和厌氧状态，厌氧微生物大

量活动而产生大量还原物质，从而使土壤呈强还原性。但是，在田间试验中，土壤 Eh 变化不显著，可能与田间 BSD 处理达不到完全密封状态、厌氧时间和有机物料添加的用量有关[7,15]。本研究 BSD 处理均能显著提高土壤 EC，主要是因为大部分盐或金属离子的释放量增加所致。因为在 BSD 处理过程中，有机物料矿化和强还原状态下，土壤中的 $Fe^{2+}$、$Me^{2+}$ 等低价金属离子[16]或 $NH_4^+$ 含量会增加[17]，从而有助于增加对土传病原菌的抑菌作用。

土壤生物消毒处理过程中，添加的有机物料经矿化降解，能显著增加土壤养分含量。有关研究表明，秸秆还田中养分释放速率表现为钾>磷>碳>氮[18-19]。本研究 BSD 处理 3 周，土壤中有机质、全氮、碱解氮和速效钾含量显著高于对照，此结果与顾志光等[13]的研究相似。BSD 处理对土壤全钾、全磷和有效磷含量无显著影响，可能原因是添加的有机物料中钾和磷含量低。相关研究表明 BSD 能有效提高土壤中全碳和全氮含量，但降低硝态氮含量[20-21]，麦秆淹水处理前期均能促进水稻田土壤溶液中溶解性有机碳(DOC)、溶解性有机氮(DON)释出[22]。

叶绿素荧光能反映逆境因子对光合作用的影响，而 $F_v/F_m$ 常被用作标明环境胁迫程度的指标和探针。胁迫条件下，植物的叶绿素荧光参数 $F_v/F_m$、光合速率、蒸腾速率等指标会有所下降[23-24]。本研究中，各 BSD 处理组的叶绿素含量和荧光参数 $F_v/F_m$ 稍高于或等于对照，可能与 BSD 处理能有效提高土壤中氮含量有关[25]。此外，番茄叶片 4 个光合参数净光合速率、气孔导度、胞间 $CO_2$ 浓度和蒸腾速率较对照无显著差异，说明土壤生物消毒对番茄光合作用无显著影响。

BSD 处理能促进作物稳产增产，主要是对土传病虫害的防控作用，其次改善土壤其他境因素等等。Shrestha 等[4]运用 Meta-Analysis 分析方法，对 123 份关于 BSD 对作物产量影响的文献进行分析表明，与对照相比，所有 BSD 处理均能显著提高作物产量。Butler 等[26]以糖蜜作为碳源，发现 BSD 处理能确保辣椒(*Capsicum annuum*)和茄子(*Solanum melongena*)的产量等于或大于溴甲烷(MeBr)的化学熏蒸消毒。李英梅等[27]研究了太阳能消毒(物理)、石灰氮麦秸(生物和化学)、垄鑫(化学)3 种不同土壤消毒方法，发现 3 种方法处理均能促进黄瓜(*Cucumis sativus*)生长和提高产量。本研究表明，BSD 处理能改善土壤质量，提高部分土壤养分，对番茄光合无显著影响，且有效缓解土传病害青枯病的侵害，降低发病率，从而能显著促进番茄生长和增加产量。另外，我们还观察到，番茄果实膨大期受冷害影响，BSD 处理番茄植株较 CK 能延缓枯萎，表现出一定的抗寒性。

## 4　结论

土壤生物消毒对连作障碍土壤的改良及促进作物生长方面起到有益的作用。与对照相比，不同 BSD 处理均能显著提高土壤 pH 和土壤温度，降低土壤 Eh 和土壤中青枯菌数量，增加土壤养分含量，促进番茄植株生长，提高番茄对青枯病的抗性，大幅增加番茄产量。此外，BSD 处理对番茄叶片活体叶绿素含量和品质也有一定的提高作用。综合来看，3 种有机添加物以麦麸的防控青枯病及增产效果最好，值得生产上推广应用。

## 参考文献　References

[1] 王洪梅. 菌株 N5 对番茄的促生及其防控番茄青枯病的作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2013
Wang H M. Effect of strain N5 in promoting tomato growth and biocontrol tomato bacterial wilt[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013

[2] 汪国平, 袁四清, 熊正葵, 等. 广东省番茄青枯病相关研究概况[J]. 广东农业科学, 2003, (3): 32–34
Wang G P, Yuan S Q, Xiong Z K, et al. A review on study of tomato bacterial wilt in Guangdong[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2003, (3): 32–34

[3] 蔡祖聪, 张金波, 黄新琦, 等. 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 469–476
Cai Z C, Zhang J B, Huang X Q, et al. Application of reductive soil disinfestation to suppress soil-borne pathogens[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 469–476

[4] Shrestha U, Augé R M, Butler D M. A meta-analysis of the impact of anaerobic soil disinfestation on pest suppression and yield of horticultural crops[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1254

[5] Momma N, Kobara Y, Uematsu S, et al. Development of biological soil disinfestations in Japan[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(9): 3801–3809

[6] 朱同彬, 孟天竹, 张金波, 等. 强还原方法对退化设施蔬菜地土壤的修复[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2619–2624
Zhu T B, Meng T Z, Zhang J B, et al. Effects of strong reductive approach on remediation of degraded facility vegetable soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2619–2624

[7] 朱同彬, 孙盼盼, 党琦, 等. 淹水添加有机物料改良退化设施蔬菜地土壤[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 335–341
Zhu T B, Sun P P, Dang Q, et al. Improvement of degraded greenhouse vegetable soil by flooding and/or amending organic materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 335–341

[8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技

出版社, 2000
Lu R K. Soil Agricultural Chemical Analysis Method[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000
[9] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2015
Wang X K, Huang J L. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2015
[10] Butler D M, Kokalis-Burelle N, Muramoto J, et al. Impact of anaerobic soil disinfestation combined with soil solarization on plant-parasitic nematodes and introduced inoculum of soil borne plant pathogens in raised-bed vegetable production[J]. Crop Protection, 2012, 39: 33–40
[11] Hewavitharana S S, Ruddell D, Mazzola M. Carbon source-dependent antifungal and nematicidal volatiles derived during anaerobic soil disinfestation[J]. European Journal of Plant Pathology, 2014, 140(1): 39–52
[12] Horita M, Kitamoto H K. Biological soil disinfestation using bioethanol fermentation products: Role of residual organic substances[J]. Journal of General Plant Pathology, 2015, 81(4): 304–314
[13] 顾志光, 马艳, 安霞, 等. 麦秸淹水处理对连作土壤性状和辣椒疫病田间防控效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1762–1769
Gu Z G, Ma Y, An X, et al. Effects of wheat straw with flooding on soil properties and *Phytophthora* blight control in continuous chili pepper cropping field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(9): 1762–1769
[14] 黄新琦, 温腾, 孟磊, 等. 土壤厌氧还原消毒对尖孢镰刀菌的抑制研究[J]. 土壤, 2014, 46(5): 851–855
Huang X Q, Wen T, Meng L, et al. Anaerobic soil disinfestation on *Fusarium oxysporum*[J]. Soil, 2014, 46(5): 851–855
[15] 戴志刚, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 油菜秸秆用量对淹水培养土壤表层溶液理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 197–201
Dai Z G, Lu J W, Lu M X, et al. Effect of rape straw rate on physicochemical properties of soil surface solution under waterlogged incubation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 197–201
[16] Momma N, Kobara Y, Momma M. $Fe^{2+}$ and $Mn^{2+}$, potential agents to induce suppression of *Fusarium oxysporum* for biological soil disinfestation[J]. Journal of General Plant Pathology, 2011, 77(6): 331–335
[17] Liu L L, Kong J J, Cui H L, et al. Relationships of decomposability and C/N ratio in different types of organic matter with suppression of *Fusarium oxysporum* and microbial communities during reductive soil disinfestation[J]. Biological Control, 2016, 101: 103–113
[18] 宋莉, 韩上, 鲁剑巍, 等. 油菜秸秆、紫云英绿肥及其不同比例配施还田的腐解及养分释放规律研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015, (3): 100–104
Song L, Han S, Lu J W, et al. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of different proportional mixture of rape straw and Chinese milk vetch in rice field[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China 2015, (3): 100–104
[19] 武际, 郭熙胜, 王允青, 等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3351–3360
Wu J, Guo X S, Wang Y Q, et al. Decomposition characteristics of rapeseed and wheat straws under different rice cultivations and straw mulching models[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(16): 3351–3360
[20] Zhu T B, Dang Q, Zhang J B, et al. Reductive soil disinfestation (RSD) alters gross N transformation rates and reduces NO and $N_2O$ emissions in degraded vegetable soils[J]. Plant and Soil, 2014, 382(1/2): 269–280
[21] 朱同彬, 张金波, 蔡祖聪. 淹水条件下添加有机物料对蔬菜地土壤硝态氮及氮素气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 109–114
Zhu T B, Zhang J B, Cai Z C. Effects of organic material amendment on vegetable soil nitrate content and nitrogenous gases emission under flooding condition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 109－114
[22] 卢萍, 单玉华, 杨林章, 等. 秸秆还田对稻田土壤溶液中溶解性有机质的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 736–741
Lu P, Shan Y H, Yang L Z, et al. Effect of wheat straw incorporation into paddy soil on dissolved organic matter in soil solution[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 736–741
[23] 张婷华, 杨再强, 李永秀, 等. 水分胁迫对番茄叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 72–76
Zhang T H, Yang Z Q, Li Y X, et al. Effect of water stress on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence in leaves of tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6): 72–76
[24] 张彩虹, 刘慧英, 于秀针. 硒对低温胁迫下番茄幼苗叶片光合特性与叶绿素荧光参数的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5): 152–157
Zhang C H, Liu H Y, Yu X Z. The effects of Se on the photosynthesis characteristic and chlorophy Ⅱ fluorescence parameters of tomato seedlings leaves under low temperature stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(5): 152–157
[25] 云菲, 刘国顺, 史宏志, 等. 光氮互作对烤烟叶片光合色素及荧光特性的影响[J]. 中国烟草学报, 2010, 16(4): 44–50
Yun F, Liu G S, Shi H Z, et al. Effects of light and nitrogen interaction on pigment and chlorophyll fluorescence characteristics in flue-cured tobacco[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2010, 16(4): 44–50
[26] Butler D M, Kokalis-Burelle N, Albano J P, et al. Anaerobic soil disinfestation (ASD) combined with soil solarization as a methyl bromide alternative: Vegetable crop performance and soil nutrient dynamics[J]. Plant and Soil, 2014, 378(1/2): 365–381
[27] 李英梅, 曹红梅, 徐福利, 等. 土壤消毒措施对土壤物理特性及黄瓜生长发育的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1189–1193
Li Y M, Cao H M, Xu F L, et al. Effects of different forms of soil disinfection on soil physical properties and cucumber growth[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1189–1193